



# Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2025) 3(4):55-74

## Optimal Planning Model for Electric Vehicle Fast Charging Stations in a Low-Polluting Distribution Network to Improve Technical and Economic Parameters

Moaiad Mohseni<sup>1</sup>, PhD, Alireza Niknam Kumlah<sup>2</sup>, M.Sc, Javad Ebrahimi<sup>3</sup>, PhD, Mahyar Abasi<sup>4,5</sup>, Assistant Professor, Mahmood Joorabian<sup>6</sup>, Professor

<sup>1</sup>Khuzestan Regional Electric Company, Ahvaz, Iran.

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

<sup>3</sup>Department of Education and Training of Isfahan Province, District 4 Management, Isfahan, Iran.

<sup>4</sup>Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

<sup>5</sup>Research Institute of Renewable Energy, Arak University, Arak, Iran.

<sup>6</sup>Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

### Abstract:

One of the biggest and most important reasons for the removal fossil cars from the global car markets is their pollution, which has caused air pollution. But the use of electric cars does not have these many problems and has led to the increasing popularity of electric cars. In most of the articles, the charging rate is considered continuous, while the charging stations work with a discrete rate and are mostly of single rate type. In this paper, the mathematical model for electric vehicles charging with a discrete rate is stated, in which the benefit of the electric vehicle consumers, the benefit of the charging coordinating unit, and the benefit of the network operator are met equally. Then, the problem of preventing high disconnections and connections that lead to damage to the charging station is expressed in mathematical form and applied to the problem. Finally, the development planning model of the discrete rate charging station in the network is proposed as an innovation and optimized by the mixed integer non-linear programming method. The results show that the electric vehicle's discrete charging rate, while simple, can bring many benefits from the point of view of flattening the load profile, providing the power required by the consumers, and meeting the network security restrictions. But the lack of development of the distribution network will prevent the growth of penetration of electric vehicles in the network. Also, the presence of these stations and their optimal planning will reduce the emission of pollutants in the environment.

**Keywords:** Optimal planning, Electric vehicle, Fast charging station, Discrete charging, Load profile, Distribution network.

**Received:** 18 March 2024

**Revised:** 03 April 2024

**Accepted:** 20 April 2024

**Corresponding Author:** Prof. Mahmood Joorabian, mjoorabian@scu.ac.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2024.1105498





## فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

## ارائه یک مدل برنامه‌ریزی بهینه برای ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای برقی در یک شبکه توزیع کم‌آلاینده با هدف بهبود پارامترهای فنی و اقتصادی

موید محسنی<sup>۱</sup>، دکتر، علیرضا نیکنام کومله<sup>۲</sup>، کارشناسی ارشد، جواد ابراهیمی<sup>۳</sup>، دکتر، مهیار عباسی<sup>۴</sup>، استادیار، محمود جورابیان<sup>۵</sup>، استاد

- ۱- شرکت سهامی برق منطقه ای خوزستان، اهواز، ایران.
- ۲- گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
- ۳- اداره آموزش و پرورش استان اصفهان، مدیریت ناحیه ۴، اصفهان، ایران.
- ۴- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه اراک، ایران.
- ۵- پژوهشکده انرژی‌های تجدید پذیر، دانشگاه اراک، اراک، ایران.
- ۶- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

**چکیده:** یکی از بزرگترین و مهم‌ترین دلایل حذف خودروهای بنزینی و دیزلی از بازارهای جهانی خودرو، میزان بالای آلاینده‌گی آنهاست که موجب شده بسیاری از شهرهای بزرگ و صنعتی در جهان با معضل آلودگی همیشگی هوا مواجه شوند و شهروندان ساکن در آنها نیز با مشکلات متعددی مواجه شوند. اما استفاده از خودروهای برقی این معضلات متعدد را نداشته و باعث استقبال روز افزون از خودروهای برقی شده است. در اکثر مقالات نرخ شارژ پیوسته در نظر گرفته شده است حال آنکه ایستگاه‌های شارژ با نرخ گسسته کار می‌کنند و اکثراً از نوع تک‌نرخ هستند. در این مقاله مدل ریاضی برای شارژ خودروهای برقی با نرخ گسسته بیان شده است که در آن منفعت مشترکین خودروی برقی، منفعت واحد هماهنگ ساز شارژ و منفعت بهره‌بردار شبکه به طور همزمان برآورده می‌شود. سپس مساله جلوگیری از قطع و وصل‌های بالا که منجر به آسیب‌رسانی به ایستگاه شارژ می‌شود در قالب ریاضی بیان شده و به مساله اعمال می‌گردد. در نهایت مدل برنامه‌ریزی توسعه ایستگاه شارژ نرخ گسسته در شبکه به عنوان نوآوری مطرح و توسط روش برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح بهینه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که نرخ شارژ گسسته خودروی برقی در عین سادگی می‌تواند فواید متعددی را از دیدگاه سطح‌سازی پروفیل بار، تامین توان مورد نیاز مشترکین، و رعایت قیود امنیت شبکه را به همراه داشته باشد. اما عدم توسعه شبکه توزیع منجر به جلوگیری از رشد سطح نفوذ خودروهای برقی در شبکه خواهد شد. همچنین حضور این ایستگاه‌ها و برنامه‌ریزی بهینه آن‌ها باعث کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها در محیط زیست می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** برنامه‌ریزی بهینه، ایستگاه شارژ خودروی برقی، شارژ گسسته، پروفیل بار، توسعه شبکه توزیع.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

نویسنده‌ی مسئول: پروفسور محمود جورابیان، mjoorabian@scu.ac.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2024.1105498



## ۱-۱- انگیزه و بیان مسئله

حدود ۳۰ درصد از میزان انتشار این آلاینده را به خود اختصاص داده است؛ از این رو مناسب است برای ایجاد یک زیست‌بوم پایدار در موضوع حمل و نقل در دنیا نگاه ویژه‌ای صورت گیرد. با توجه به نقش عمده خودروها در این بخش، فناوری‌های بسیار متنوعی برای بهبود عملکرد آن‌ها از منظر انرژی، اقتصاد و محیط زیست ارائه شده است. مهم‌ترین فناوری ارائه شده در این زمینه انواع خودروهای الکتریکی است. در دیدگاه کلان انرژی، استفاده از خودرو تمام الکتریکی و هیبریدی می‌تواند بسته به نحوه تأمین برق و سوخت اولیه در اروپا، در حدود ۲ تا ۳ برابر در مصرف انرژی صرفه‌جویی نماید. به بیان دیگر، در خودرو احتراق داخلی، لازم است ۲ تا ۳ برابر، سوخت فسیلی بیشتری استخراج شود تا بتوانیم انرژی مکانیکی برابر در چرخ خودرو ایجاد نماییم. از دیدگاه روش‌های مدیریت شارژ خودروهای برقی یا هیبریدی دو روش شارژ هماهنگ و شارژ غیرهماهنگ وجود دارد که در [۱] به توصیف آن‌ها پرداخته شده است. ایستگاه‌های شارژ به عنوان یکی از زیرساخت‌های لازم برای تأمین برقی باتری‌های خودروی برقی اهمیت بالایی در شبکه توزیع دارد. انتخاب مکان مناسب و ظرفیت بهینه شارژ این ایستگاه‌ها می‌تواند اثرات منفی خودروهای برقی را کاهش دهد. جایابی ایستگاه‌های شارژ به طور کلی به دو دسته، ایستگاه‌های شارژ کند و شارژ سریع<sup>۱</sup> تقسیم می‌شود [۲].

## ۱-۲- پیشینه پژوهش

در مرجع [۳] نرخ شارژ گسسته‌ی قابل تعمیم در نظر گرفته شده است و مساله‌ی بهینه‌سازی سعی در یافتن لحظه‌ی بهینه‌ی شروع شارژ هر یک از خودروها را داشته است. به طور خاص از یک الگوریتم تصادفی غیرمتمرکز در طراحی استفاده شده است که با روش‌های مبتنی بر تکرار به حل مساله پرداخته است و همگرایی این روش نیز بررسی شده است. در مرجع [۴] به طور ضمنی فرض شده است که عملکرد شارژ مستقل از مکان شارژ باشد. اما این شرط در عمل درست نیست چون مکان شارژ خاص می‌تواند تأثیر بالایی بر شرایط محدودزای شبکه به خصوص شبکه‌های ضعیف داشته باشد. در مرجع [۵] برای جلوگیری از اضافه‌باری ترانسفرمر شبکه توزیع فرض شده است، انواع شرایط بارگذاری شبکه بررسی شده است و یک نقطه‌ی بهینه برای روش متمرکز ارائه شده است اما این روش از دیدگاه محاسباتی بسیار سنگین بوده و ضمانتی برای یافتن جواب بهینه ارائه نمی‌دهد.

در مرجع [۶] اثرات شارژ خودروی برقی<sup>۲</sup> بر ترانسفرمر توزیع با جزئیات بیشتری بررسی شده است و فرآیند برنامه‌ریزی شارژ متمرکز این خودروها با در نظرگیری قیود مربوط به ظرفیت اجرای شبکه ارائه شده است. در مرجع [۷] مساله‌ی شارژ هماهنگ خودروهای برقی بر دو مساله‌ی مهم تمرکز دارد. اول اینکه چگونه می‌شود الگوریتمی مقیاس‌پذیر برای افزایش جمعیت خودروهای برقی را تشکیل داد. دوم اینکه چگونه می‌توان الگوریتمی زمان واقعی<sup>۳</sup> یا آنلاین برای کمینه‌سازی اثرات عدم قطعیت خودروی برقی (مانند زمان اتصال آن به شبکه یا توان مصرفی و ...) ارائه داد. در مرجع [۸] به طراحی معماری کنترلی جدیدی برای استخراج الگوریتم‌های قابل تعمیم مربوط به مدیریت سمت تقاضای خودروهای هیبریدی پرداخته است. در این مرجع مساله‌ی متمرکز تبدیل به سه مرحله شده است که عبارتند از: ادغام، بهینه‌سازی و کنترل. در مرجع [۹] با استفاده از یک فاکتور انتخابی مناسب، برنامه‌ریزی طوری اجرا می‌شود که حد دست پایین بار آتی خودروهای برقی در مساله وارد که این روش بسیار ساده قابل پیاده‌سازی است. همچنین در روشی برای تخمین بار با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی و یا تحلیل داده‌های میدانی ارائه شده است.

در مرجع [۱۰] برنامه‌ریزی توسعه ایستگاه شارژ خودروی برقی در شبکه‌های پرتردد حمل و نقل ارائه شده است که در آن ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی دارای محدودیت از پیش تعیین شده هستند. مدل حل مساله نیز از نوع برنامه ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح است. در مرجع [۱۱] یک چارچوب ادغام شده از برنامه ریزی ارائه شده است که هزینه کل زیرساخت‌های خودروی برقی را در نواحی شهری کمینه می‌کند. در مرجع [۱۲] از مدل برنامه‌ریزی تصادفی برای ایستگاه شارژ خودروی برقی مجهز به نقاط شارژ چندکابله تک خروجی ارائه شده است تا هزینه سالیانه معادل را با در نظرگیری شارژ هماهنگ کمینه کند. در این مرجع مدل جدیدی برای جایگاه‌های دارای کابل‌های چندگانه ارائه شده است. از مدل برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای تصادفی برای برنامه‌ریزی پارکینگ‌های عمومی مجهز به این کابل‌ها استفاده شده است. در مرجع [۱۳] از روش بهینه‌سازی غیرخطی آمیخته عدد صحیح<sup>۴</sup> برای جایابی بهینه و تعیین ظرفیت





بهینه‌ی ایستگاه‌های شارژ سریع استفاده شده است که در آن هزینه ساخت ایستگاه، تلفات انرژی خودرو، تلفات شبکه برق و مکان ایستگاه‌های شارژ و جاده‌های شهری در نظر گرفته شده است.

در مرجع [۱۴] از تئوری درخواست برای تعیین تعداد بهینه‌ی تجهیزات شارژ برای تامین نیاز خودروها و بهبود کیفیت سرویس‌دهی استفاده شده است. در مرجع [۱۵] به چالش‌های مربوط به تعیین ظرفیت بهینه‌ی ایستگاه شارژ خودروی برقی پرداخته شده است که بر اساس مشخص‌سازی بار شارژ سریع خودروها توسط تکنیک مدل‌سازی مارکوف می‌باشد. تعداد شارژها و فضای انتظار ایستگاه شارژ سریع نیز به تواماً بهینه شده است تا حداکثر سود ایستگاه حاصل شود. در مرجع [۱۶] جایابی ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی در مساله برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع مطرح شده است. جایابی ایستگاه‌های شارژ به عنوان یکی از حیاتی‌ترین و مهم‌ترین راه‌کارها برای گسترش بهینه خودروهای برقی مطرح شده است که از دیدگاه فنی و اقتصادی حائز اهمیت است. در مرجع [۱۷] ادغام جایابی پارکینگ‌های شارژ خودروی برقی و منابع تولید پراکنده در برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع ارائه شده است. سه مورد به عنوان علل اصلی این ادغام بیان شده است: بهره‌گیری از منابع انرژی پاک، تامین قابل اطمینان بار شبکه، و توسعه پایدار شبکه‌های توزیع.

در مرجع [۱۸] نیز مدلی تصادفی-احتمالاتی (ترکیب توزیع احتمال و توابع عضویت فازی) برای جایابی پارکینگ خودروی برقی در برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع ارائه شده است که در آن به نقش بارز پارکینگ‌های شارژ در شبکه‌های هوشمند مبتنی بر تولیدات پراکنده تاکید شده است. در مرجع [۱۹] ادغام ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی با برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع مورد ارزیابی قرار گرفته است که در قالب یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه<sup>۵</sup> در آمده است. در مرجع [۲۰] ادغام مدیریت شارژ هماهنگ خودروهای برقی با برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع ارائه شده است. بهره‌گیری گسترده از خودروهای برقی به همراه عدم قطعیت آن‌ها موجب تغییراتی در برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال شده است که در این مرجع از یک استراتژی مبتنی بر سناریو برای ادغام خودروها در شبکه استفاده شده است. در مرجع [۲۱] مدل منعطف برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع ارائه شده است که در قالب روش دینامیکی دو مرحله‌ای درآمده است. تاثیر شارژ هماهنگ خودروهای برقی در پارکینگ‌های شارژ و میزان تناقض میان اهداف صاحب پارکینگ و شرکت بهره‌بردار شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۲۲] مدل‌سازی عدم قطعیت و مدل‌سازی مساله برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع فعال<sup>۶</sup> در حضور ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی ارائه شده است.

در مرجع [۲۳] عدم قطعیت خودروهای برقی در مساله برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع مدل شده است که در آن منابع انرژی تجدیدپذیر، ذخیره‌ساز و ایستگاه‌های شارژ نیز مدل شده است. در این مرجع نیز از روش تصادفی مبتنی بر سناریو استفاده شده است و با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی اقدام به کاهش سناریوها شده است. در مرجع [۲۴] نیز مدیریت عدم قطعیت خودروهای برقی در برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع بیان شده است. چه خودروی برقی و چه هیبرید پتانسیل بالایی در شبکه‌های توزیع دارند و با جذب یا تزریق توان الکتریکی خود به شبکه می‌توانند مانند یک بار یا منبع تولید توان دارای عدم قطعیت عمل نمایند. اهمیت اصلی این مقاله در نزدیک‌سازی مسائل شارژ خودروی برقی به دنیای واقعی است. در واقع نرخ شارژی که ایستگاه‌های شارژ سریع خودروی برقی ارائه می‌دهند یک متغیر پیوسته نیست بلکه مقدار گسسته با سطوح شارژ مختلف است.

در [۲۵] یک ساختار دو سطحی برای اجرای بازارهای رقابتی و خدمات جانبی در شبکه‌های انتقال و توزیع ارائه شده است. در سطوح اول و دوم ساختار پیشنهادی بازارهای انرژی و خدمات جانبی برگزار می‌شوند. در این ساختار پیشنهادی، تأمین‌کنندگان ظرفیت‌های بازار رزرو چرخان، واحدهای حرارتی سنتی هستند، در حالی که تأمین‌کنندگان ظرفیت‌های بازار تنظیم‌کننده ژنراتورهای با عکس‌العمل سریع، سیستم‌های ذخیره‌ساز، خودروهای الکتریکی و تجمیع‌کنندگان پاسخ تقاضا هستند.

### ۱-۳- سهم تحقیقاتی

در تحقیقات مربوط اکثرأ نرخ شارژ متغیری پیوسته در نظر گرفته می‌شد اما هدف این تحقیق در نظرگیری نرخ شارژ به عنوان متغیری گسسته است و مدلی گسسته برای شارژ هماهنگ خودروهای برقی ارائه می‌شود. همچنین در پژوهش‌ها ترکیب بهینه‌سازی شارژ گسسته‌ی خودروهای برقی و جایابی ایستگاه‌های شارژ مطرح نشده است که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود. یکی دیگر از مشکلاتی که در اکثر مراجع مشاهده شده، استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای حل مسئله بوده است، مانند مراجع [۱۶، ۱۲] و [۲۶، ۲۷] این روش‌ها خیلی سریع به جواب می‌رسند اما گاهی اوقات در یافتن بهینه سراسری دچار مشکل می‌شوند لذا برای حل این مسئله سعی شده تا برای رفع مشکل بهینه سراسری<sup>۷</sup> از روش کلاسیک برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح استفاده شود.



## ۱-۴- نوآوری‌ها

- ✓ بهینه‌سازی همزمان شارژ خودروها و طراحی ایستگاه شارژ خودروی برقی با نرخ شارژ گسسته
- ✓ ارائه‌ی مدل گسسته‌ی برای برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع
- ✓ استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح در محیط نرم افزار متلب<sup>۸</sup>

## ۱-۵- بخش‌بندی مقاله

در ادامه بخش‌بندی مقاله به این صورت است که، در بخش ۲ توصیف مدل پیشنهادی، روابط، قیود و روندنمای برنامه‌ریزی ارائه شده و در بخش ۳ شبیه‌سازی‌های انجام شده در سناریوهای مختلف انجام شده و در بخش ۴ خلاصه نتایج و نتیجه گیری ارائه می‌گردد.

## ۲- مدل سازی و فرمولاسیون مساله

### ۱-۲- مرحله اول: شارژ هماهنگ خودروهای برقی

وضعیتی را در نظر بگیرید که یک هماهنگ‌کننده‌ی خودروی برقی عملیات شارژ تمام خودروهای برقی را در پست توزیع بالادستی بر عهده دارد. بازه‌ی زمانی مورد مطالعه به بازه‌های ۱۵ دقیقه‌ای تقسیم کنیم. بنابراین مجموعه زمان‌های مورد مطالعه با نماد  $T = \{1, 2, \dots, T\}$  نشان داده می‌شود. تعداد خودروهای شبکه توزیع نیز با نماد مجموعه  $N = \{1, 2, \dots, N\}$  و تعداد باس‌های مربوط به بار شبکه نیز با نماد مجموعه  $M = \{1, 2, \dots, M\}$  نشان داده می‌شوند. بر اساس توپولوژی شبکه مجموعه باس‌های بار شبکه خود به  $M$  زیرمجموعه تقسیم می‌شوند که نماد  $n \in N_m$  است اگر خودروی  $n$  متصل به باس  $M$  شبکه باشد.

یک خودروی برقی در زمان بین ورود و خروج آن به پارکینگ به شبکه اتصال دارد. شاخصی برای اتصال خودروی برقی به نام  $I_{n,t}$  را در نظر بگیرید که اگر خودروی  $n$  در زمان  $t$  به شبکه متصل باشد برابر ۱ شده و در سایر موارد برابر صفر باشد. برای مورد تک‌شارژی مساله‌ی پایه شارژ هماهنگ خودروی برقی فرض شده است که چه خودرو شارژ شود یا نشود به هر حال به شبکه باید متصل باشد. متغیری برای زمانبندی و برنامه‌ریزی به نام  $U$  را تعریف می‌کنیم که هر متغیر آن بیانگر وضعیت اتصال هر خودرو را در هر ساعت به شبکه نشان می‌دهد. در واقع این متغیر یک ماتریس است که تعداد سطرهای آن برابر تعداد خودروهای برقی و تعداد ستون‌های آن برابر تعداد بازه‌های زمانی مورد مطالعه است که درایه‌های این ماتریس به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۲۴]. داریم:

$$u_{n,t} = \begin{cases} 1 & \text{if } I_{n,t} = 0 \text{ and charging mode} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

رابطه (۱) نشان می‌دهد که تنها زمانی یک خودرو در حال شارژ قرار گرفته باشد، پارامتر  $u_{n,t}$  برابر با یک خواهد شد و در سایر زمان‌های مورد بررسی مقدار صفر را به خود اختصاص خواهد داد. در این مقاله تنها فرآیند شارژ خودروهای برقی انجام می‌شود و هیچ‌گونه قابلیت‌ی برای دشارژ خودروهای برقی (یا به اصطلاح اتصال خودرو به شبکه<sup>۹</sup>) در نظر گرفته نشده‌است. در جدول (۱) واژه‌نامه روابط آورده شده است.

در این مقاله هدف نهاد هماهنگ‌کننده‌ی شارژ خودروهای برقی، اصلاح الگوی مصرف بار کل شبکه از طریق مسطح‌سازی آن (یا به اصطلاح کاهش انحراف بار از مقدار میانگین آن) است. عموماً بار شبکه طوری مدیریت می‌شود که سود اقتصادی را در بازار برق بیشینه نماید و هزینه بهره‌برداری را با حفظ ملزومات پایداری شبکه کمینه سازد. بنابراین نتایج باید طوری باشد که هر سه هدف نایل گردد. هم هماهنگ‌کننده، هم شبکه و هم مشتری باید به اهداف خود دست یابند. بنابراین در این مقاله برای دستیابی به هر سه هدف ممکن سعی شده‌است که این اهداف در تابع هدف و یا در قیود مرزی مساله گنجانده شوند.

۱- برای اینکه سود نهاد هماهنگ‌کننده‌ی شارژ بیشتر شود و یا اینکه جریمه‌ی کمتری برای تخطی توان خود از مقدار میانگین بپردازد، تابع هدف مساله به صورت رابطه‌ی (۲) نگارش می‌شود تا این هدف در اولویت قرار گیرد و رضایت نهاد تنظیم هماهنگ شارژ تامین گردد. بنابراین تابع هدف به صورت زیر در می‌آید [۲۴]:

$$F(U) = \sum_{t=1}^T f_t \left( r_0 \sum_{n=1}^N u_{n,t} + D(t) - L(t) \right) \quad (2)$$





جدول ۱: واژه نامه

متغیر	توصیف
B	تعداد شارژ‌های در حال کار
$c_1$	ضریب هزینه شارژ‌های در حال کار
$c_2$	ضریب هزینه درخواست‌های پذیرفته شده شارژ
$c_3$	ضریب هزینه درخواست‌های رد شده شارژ
$c_4$	ضریب هزینه شارژ‌های بی‌کار
$c_5$	ضریب هزینه فضاهای انتظار بلااستفاده
$C_{sub}$	ظرفیت ترانسفرمر متصل به ایستگاه شارژ
$C_m$	ظرفیت ترانسفرمر توزیع متصل به باس m
$C_{m,t}$	شاخصی از ظرفیت آزاد ترانسفرمر متصل به باس m
$D_m(t)$	بار پایه باس m در بازه زمانی t
$D(t)$	بار پایه هر باس قبل از شارژ خودروهای برقی
$e_n$	انرژی مورد نیاز برای شارژ هر خودروی برقی
$E(t)$	امید ریاضی سود ایستگاه شارژ در بازه زمانی t
$F(U)$	تابع هزینه شارژ خودروهای برقی (تابع هزینه عدم مسطح سازی بار)
$f_t$	تابع محاسبه جریمه هر تخطی در مسطح سازی بار
$G(U)$	تابع هدف کمینه‌سازی تعداد سوئیچینگ (قطع و وصل) خودروها
$I_s$	تعداد شارژ‌های بی‌کار (خالی)
$I_w$	تعداد فضاهای انتظار بی‌کار (خالی)
$I_{n,t}$	متغیری که وضعیت اتصال خودروی برقی را به برق نشان می‌دهد.
L	تعداد درخواست های پذیرفته شده شارژ خودرو
$L(t)$	پروفیل بار مطلوب شبکه (که در اینجا میانگین بار قرار داده شده است)
N	حداکثر تعداد خودروهایی که یک ایستگاه شارژ می‌تواند پاسخگوی آن باشد.
$P_b$	بار پایه مربوط به یک باس
$P_f$	نرخ شارژ نامی ایستگاه شارژ
$P_k$	احتمال اینکه k خودروی برقی در ایستگاه شارژ حضور داشته باشند.
$P_n$	احتمال اینکه درخواست شارژ خودروی برقی رد شود.
$r_0$	نرخ شارژ گسسته خودروی برقی (تک نرخی)
R	تعداد درخواست‌های رد شده شارژ خودرو
S	تعداد شارژ‌های خودروی برقی
$S_v$	حداکثر تعداد شارژ‌های خودروهای برقی بدون تخطی از قیود ولتاژی
$S_{max}$	حداکثر تعداد مجاز شارژ‌های خودروی برقی
T	بازه زمانی
$t_n^i$	زمان شروع شارژ خودروی n
$t_n^d$	زمان اتمام شارژ خودروی n
$U^*$	جواب های بهینه بدست آمده از رابطه ۶
$u_{n,t}$	وضعیت شارژ خودروی n در بازه زمانی t
V	متغیر نشان دهنده توان شارژ مجموع خودروها در هر بازه زمانی
W	تعداد فضای انتظار خودروهای برقی
$W_{max}$	حداکثر تعداد مجاز فضای انتظار خودروهای برقی
$\rho$	ظرفیت سرویس‌دهی ایستگاه شارژ
$\lambda$	نرخ ورود خودروهای برقی به ایستگاه شارژ



که در آن  $D(t)$  بار پایه کل باس‌های شبکه است که معمولاً غیرقابل تغییر است. همچنین تابع  $f_t$  تابع محدب وابسته به زمان است که هزینه انحراف از بار مطلوب را حساب می‌کند. پارامتر  $L(t)$  بیانگر پروفیل بار مطلوب شبکه است. در این مقاله، بار مطلوب شبکه برابر

$$L(U) = \sum_t (r_0 \sum_{n=1}^N u_{n,t} + D(t)) / T \quad \text{شده است} \quad (2)$$

۲- برای اینکه منافع و انتظارات مشترکین خودروهای برقی در مساله گنجانده شود، تامین میزان شارژ مورد نیاز هر خودروی برقی در قالب قید مرزی (۳) در مساله لحاظ می‌گردد. در واقع قید شارژ نشان می‌دهد میزان انرژی مورد نیاز خودروی برقی در انتهای زمان شارژ باید برابر با میزان مطلوب مورد انتظار وی باشد. از نظر ریاضی این قید را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sum_{t=t_n^i}^{t_n^d} u_{n,t} = e_n \quad (3)$$

معادله (۳) ضمانت می‌کند که به هر خودروی برقی زمان کافی برای شارژ اختصاص داده شده است تا به مقدار مطلوب شارژ خود رسیده باشد. نکته‌ی جالب دیگری در اینجا نهفته است که به نوعی تفاوت شارژ خودروهای برقی در حالات نرخ شارژ گسسته و پیوسته بهتر بیان می‌کند. در مواردی که نرخ شارژ پیوسته بود معمولاً مقدار انرژی مورد نیاز خودروها در قالب کیلووات ساعت بیان می‌شد چون نرخ شارژ ثابت نبود و نمی‌توان به طور قطعی گفت که چند ساعت برای تامین این انرژی کفایت می‌کند. اما در شارژ گسسته، با توجه به تک نرخ بودن توان ایستگاه‌های شارژ و غیرقابل تغییر بودن آن دیگر نیازی به بیان انرژی در قالب کیلووات ساعت نیست چون نرخ شارژ معلوم است، به راحتی زمان شارژ با تقسیم کردن کیلووات ساعت مورد نیاز خودرو بر نرخ شارژ ایستگاه به صورت  $t_n^{req} = e_n / r_0$  بدست می‌آید. در این حالت به راحتی می‌توان گفت که زمان شارژ هر خودرو چقدر است و به جای محاسبه سطح شارژ مورد نیاز خودرو تنها مدت زمان شارژ خودرو کفایت خواهد کرد. در این مقاله فرض شده است که هر خودرو نیاز به ۶ ساعت زمان برای شارژ خود دارد. بنابراین هر خودرو در طول روز باید در ۶ وعده یک ساعته شارژ گردد. اگر نرخ شارژ را در این مقاله بر اساس شارژهای سطح ۲ استاندارد در نظر بگیریم (نرخ شارژ ۳/۳ کیلوواتی)، در این صورت مشخص می‌شود که هر خودرو نیاز به ۱۹/۶ کیلووات ساعات برای شارژ خود دارد.

۳- در نظرگیری منافع شرکت بهره‌بردار شبکه توزیع دارای اهمیت است که آن هم در قالب یک قید مرزی در مساله وارد شده است. از دیدگاه بهره‌بردار شبکه، امنیت شبکه یک فاکتور مهم است که باید در نظر گرفته شود. در شبکه توزیع، معمولاً ترانسفرمر توزیع شبکه (که به هر باس متصل شده است) به عنوان آسیب‌پذیرترین المان‌های شبکه در نظر گرفته می‌شود. به طور ویژه، توان عبوری از این ترانسفرمر باید در ظرفیت مجاز آن قرار گیرد و از اضافه بار خودداری شود. این ترانسفرمرها در زمانی که چند خودروی برقی را بخواهند شارژ کنند، در معرض پدیده‌ی همزمانی شارژ ممکن است قرار گرفته و معضل اضافه باری در آنها ایجاد شود. ترانسفرمرها طوری طراحی شده‌اند که در بار نامی خود عملکرد مساعدی داشته باشند و اضافه باری منجر به گرمایش بیش از حد این ترانسفرمرها شده و از عمر آنها می‌کاهد و حتی امکان عبور نقطه‌ی کار ترانسفرمر از نقطه‌ی زانویی بهینه و ورود آن به ناحیه اشباع مغناطیسی وجود خواهد داشت. بنابراین به منظور جلوگیری از اضافه بار ترانسفرمر قید زیر اعمال می‌گردد [۲۲]:

$$r_0 \sum_{n \in N_m} u_{n,t} + D_m(t) \leq C_m, \quad \forall m \in M, t \in \tau \quad (4)$$

که رابطه (۴)  $C_m$  ظرفیت ترانسفرمر توزیع باس  $m$  است. با کمی عملیات ریاضی و پس از ساده‌سازی می‌توان رابطه (۴) را (که سمت راست آن ظرفیت نامی ترانسفرمر بود) به صورت قید (۵) (که سمت راست آن شاخصی از ظرفیت آزاد ترانسفرمر است) بازنویسی کرد:

$$\sum_{n \in N_m} u_{n,t} \leq C_{m,t}, \quad \forall m \in M, t \in \tau \quad (5)$$

که در این رابطه  $C_{m,t} = \left[ \frac{C_m - D_m(t)}{r_0} \right]$  برابر با نسبت ظرفیت آزاد خط بر نرخ شارژ ایستگاه است که به صورت براکت محاسبه شده است. این پارامتر تعداد خودروهای مجازی که در هر بازه زمانی  $t$  می‌توانند توسط ترانسفرمر توزیع سرویس‌دهی شوند را نمایش می‌دهد. بنابراین مجموع خودروهای در حال شارژ در هر لحظه باید از پارامتر  $C_{m,t}$  کمتر باشند تا ترانسفرمر باس با اضافه باری مواجه نگردد. بنابراین مدل شارژ هماهنگ خودروی برقی با نرخ توان گسسته‌ی به صورت رابطه (۶) و قیود (۷) و (۸) می‌تواند نوشته شود:





$$OCDC: \min_U F(U) \quad (6)$$

$$s. t. \sum_{n \in N_m} u_{n,t} \leq c_m, \quad \forall m \in M, t \in \tau \quad (7)$$

$$s. t. \sum_{t=t_h^d}^{t_h^d} u_{n,t} = e_n, u_{n,t} \in \{0,1\} \quad (8)$$

در مورد رابطه‌ی (۶) ذکر چند نکته ضروری به نظر می‌رسد [۲۶]:

۱- رابطه‌ی (۶) تنها منافع سه نهاد را در نظر گرفته است که عبارتند از مشترکین، نهاد هماهنگ‌سازی شارژ و شرکت بهره‌برداری شبکه توزیع. اما هیچ‌گونه توجهی به سلامت و امنیت ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی نشده است. به بیان علمی‌تر تنها رابطه‌ی (۶) هدفش مسطح‌سازی پروفیل بار شبکه با رعایت تامین برق مشترکین و ظرفیت ترانسفرهای توزیع که نشان می‌دهد در هر لحظه چه تعداد خودرو شارژ باشند. اما هیچ توجهی به روند لحظه‌ای شارژ خودروها نشده است. در واقع دفعات روشن و خاموشی خودروها، یا قطع و وصل شارژ آنها در مساله لحاظ نشده است.

۲- اگر محدودیتی برای دفعات شارژ و دشارژ لحاظ نگردد، عمر مفید ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی کاسته خواهد شد و در عمل موجب ایجاد فراجهدش‌های متنوعی در مدارات الکترونیکی این دستگاه‌ها شده و مدارات آنها را با مشکلات فنی و اقتصادی متعددی مواجه خواهد کرد. در این صورت هزینه‌های مازادی برای تعویض ایستگاه‌های شارژ فرسوده و نو باید لحاظ نمود.

۳- در اکثر موارد مالکان خودرو نیز ترجیح می‌دهند که تعداد سوئیچینگ آنها تا حد امکان کمینه باشد. در واقع سوئیچینگ دو مشکل دیگر دارد. اول اینکه منجر به فرسودگی باتری خودروها شده و دوم موجب ایجاد اسپایک‌هایی در باس‌های بار می‌شود که پایداری ترانسفرم توزیع را با اختلال مواجه می‌کند.

جهت حل این مشکل، می‌توان یک مساله‌ی بهینه‌سازی جدا (به نام مساله پیرو) ایجاد شود که تابع هدف آن کمینه‌سازی تعداد کلیدزنی‌های شبکه بوده و قیود مرزی همان قیود رابطه (۶) بوده و تنها یک شرط جدید بدان اضافه گردد. این شرط جدید که در قالب رابطه (۷) نوشته می‌شود این است که در هر لحظه تعداد خودروهای در حال شارژ مساله پیرو برابر با جواب بهینه تعداد خودروهای در حال شارژ مساله (۶) (مساله پیشرو) شود تا پروفیل بار شبکه هیچ تغییر نکند. با در نظرگیری مساله‌ی پیرو رابطه (۹) مقید به مجموعه قیود (۱۰)، منافع مربوط به ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی نیز در مساله گنجانده شده است. بنابراین مساله‌ی پیرو شارژ هماهنگ خودروی برقی با شارژ گسسته که با هدف کمینه‌سازی سوئیچینگ خودروهای برقی پیاده‌سازی شده است برابر خواهد بود با [۲۷]:

$$SOCDC: \min_U G(U) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^T (u_{n,t} - u_{n,t+1})^2, U \in U^* \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} s. t. \sum_{n \in N_m} u_{n,t} \leq c_m, \quad \forall m \in M, t \in \tau \\ s. t. \sum_{t=t_h^d}^{t_h^d} u_{n,t} = e_n \\ s. t. \sum_{n=1}^{N_{EV}} u_{n,t} = v_t^*, u_{n,t} \in \{0,1\} \end{array} \right. \quad (10)$$

مساله‌ی بهینه‌سازی رابطه‌ی (۹) یک مساله برنامه‌ریزی عدد صحیح مرتبه‌ی دوم است. می‌توان با اعمال روش‌های تغییر (تعریف متغیرهای اضافی) شکل مساله را خطی‌سازی کرده و فرم برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح از آن ارائه کرد که به سادگی قابل حل با جعبه‌ابزارهای موجود برای حل مسائل بهینه‌سازی خطی شود. در ادامه روند خطی‌سازی و تغییر فرم این مساله ارائه خواهد شد. به منظور تغییر فرم مساله‌ی (۹) به شکل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح، دو متغیر که بیانگر وضعیت روشنی و وضعیت خاموشی هر یک





از یک از خودروهای برقی هستند را به ترتیب به صورت  $\mathcal{Y}_n^t$  و  $Z_n^t$  تعریف می‌کنیم. بنابراین می‌توان قیود مرزی را بصورت رابطه (۱۱) بیان کرد [۲۱]:

$$y_n^t - z_n^t = u_n^{t+1} - u_n^t, \quad \forall n, t; \quad y_n^t, z_n^t, u_n^t \in \{0,1\} \quad (11)$$

رابطه‌ی (۱۱) به خوبی و سادگی ارتباط بین سه متغیر وضعیت شارژ، وضعیت روشنی و خاموشی را نشان می‌دهد. به طور مثال فرض کنید وضعیت شارژ از صفر به یک تغییر کند ( $u_{n,t+1} - u_{n,t} = 1$ )، در این صورت  $y_n^t - z_n^t = 1$  خواهد شد. چون هر دو متغیر روشنی و خاموشی عدد باینری هستند، تنها زمانی این معادله صدق می‌شود که  $y_n^t = 1$  و  $z_n^t = 0$  شود. از طرف دیگر وضعیتی را در نظر بگیرید که در آن خودرو از وضعیت شارژ ۱ به صفر رسید باشد در این صورت ( $u_{n,t+1} - u_{n,t} = -1$ ) خواهد بود و در نتیجه  $y_n^t - z_n^t = -1$  خواهد شد. به طور مشابه چون متغیرهای روشنی و خاموشی اعداد باینری هستند، تنها جواب این معادله  $y_n^t = 1$  و  $z_n^t = 0$  بود. تنها یک حالت باقی می‌ماند که در آن خودرو هیچ تغییری وضعیتی ندهد. در این حالت عبارت تغییر وضعیت ( $u_{n,t+1} - u_{n,t} = 0$ ) خواهد شد و خواهیم داشت:  $y_n^t - z_n^t = 0$ . مشاهده می‌شود که این مساله به دو جواب خواهد رسید یک جواب قابل قبول  $y_n^t = z_n^t = 0$  و دیگری یک جواب غیرقابل قبول  $y_n^t = z_n^t = 1$ . به منظور جلوگیری از همگرایی الگوریتم به این جواب غیرقابل قبول شرط مرزی دیگری نیز باید به مساله اعمال شود. این شرط بیان می‌دارد که خاموشی و روشنی یک خودرو نمی‌تواند به طور همزمان رخ دهد. بنابراین داریم:

$$y_n^t + z_n^t \leq 1, \quad \forall n, t \quad (12)$$

بنابراین فرم برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مساله (۹) به صورت تابع هدف رابطه (۱۳) به همراه مجموعه قیودش در مجموعه روابط (۱۴) تبدیل خواهد شد [۲۷،۲۸].

$$\text{SOCD C: } \min_U G(U) = \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^T (y_n^t - z_n^t), \quad U \in U^*; \quad \begin{cases} y_n^t - z_n^t = u_n^{t+1} - u_n^t, \quad \forall n, t \\ y_n^t + z_n^t \leq 1, \quad \forall n, t \\ y_n^t, z_n^t, u_n^t \in \{0,1\} \end{cases} \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{s. t. } \sum_{n \in N_m} u_{n,t} \leq c_m, \quad \forall m \in M, t \in \tau \\ \text{s. t. } \sum_{t=t_n^l}^{t_n^d} u_{n,t} = e_n \\ \text{s. t. } \sum_{n=1}^{N_{EV}} u_{n,t} = v_t^* \end{array} \right. \quad (14)$$

مشاهده می‌شود که به سادگی مساله به فرم خطی عدد صحیح درآمده و قابل حل با نرم‌افزارهای تجاری موجود برای بهینه‌سازی‌ها می‌باشد. در این مقاله از جعبه‌ابزار قدرتمند YALMIP برای حل مساله‌ی بهینه‌سازی استفاده شده‌است. با تعریف متغیرهای بهینه‌سازی، تابع هدف و قیود مرزی این جعبه‌ابزار اقدام به جستجوی جواب‌ها با استفاده از روش‌های موسوم به ساقه و ریشه می‌کند. در این مقاله به منظور تسهیل افزایش سطح نفوذ خودروهای برقی اقدام به توسعه شبکه توزیع از طریق طراحی یک ایستگاه شارژ خودروهای برقی در نواحی تجاری شده‌است که در ادامه به جزئیات آن پرداخته خواهد شد [۲۴،۲۷،۲۸].

## ۲-۲- مرحله دوم: طراحی ایستگاه‌های شارژ سریع

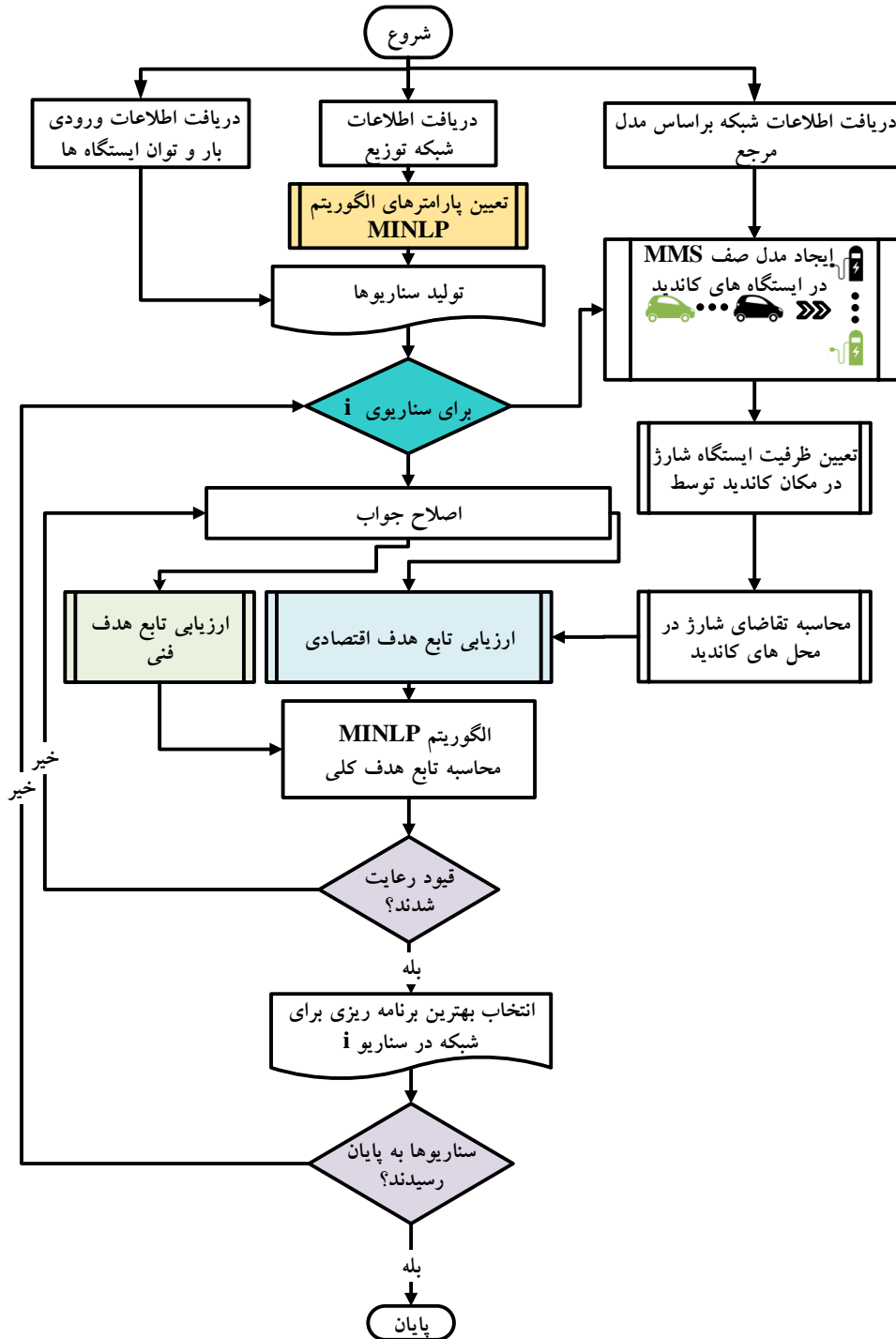
معمولاً توسعه‌ی ایستگاه‌های شارژ در دو قالب مجزا صورت می‌گیرد که یکی مربوط به تعیین مکان بهینه و دیگری مربوط به تعیین ظرفیت بهینه ایستگاه شارژ است. در این مقاله چون تمامی باس‌های شبکه مسکونی هستند (و امکان توسعه ترانسفرمر توزیع آنها وجود ندارد) و تنها یک باس تجاری وجود دارد، مکان نصب ایستگاه شارژ در باس تجاری خواهد بود. منظور از سود بهره‌برداری ایستگاه



شارژ خودروی برقی اختلاف میان درآمد ایستگاه و هزینه‌های آن است. بنابراین سود مربوط به ایستگاه شارژ خودروهای برقی برابر خواهد بود با:

$$E = c_1 B - (c_2 L + c_3 R + c_4 I_s + c_5 I_w) \quad (15)$$

که در رابطه (۱۵)  $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$  ضرایب هزینه هستند. همچنین  $B, L, R, I_s$  و  $I_w$  به ترتیب تعداد شارژهای مشغول، تعداد درخواست‌های اعلامی، تعداد درخواست‌های رد شده، تعداد شارژهای بی‌کار و فضای درحال انتظار هستند. محاسبه هر یک از پارامترها بر اساس میانی احتمال انجام می‌شود. فرض کنید که پارکینگ دارای  $s$  ایستگاه شارژ باشد که هر ایستگاه قادر به سرویس دهی به  $\rho$  تعداد خودرو (توسط شارژرهایش) باشد. بنابراین ظرفیت کل پارکینگ برابر با  $sp$  خودرو (یا شارژر) خواهد بود. اگر  $P_N$  درصد از خودروها انصراف دهند. در این صورت تعداد شارژر مشغول به کار ایستگاه شارژ بر اساس رابطه‌ی (۱۶) محاسبه می‌شود:



شکل (۱): فلوچارت روند برنامه ریزی

$$B = sp - spP_N = sp(1 - P_N) \quad (16)$$

همچنین تعداد درخواست‌های que شده بر اساس رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$L = \sum_{k=s+1}^N (k - s)P_k \quad (17)$$

اگر فرض شود که نرخ ورود خودروها به پارکینگ شارژ برابر با  $\lambda$  باشد و  $P_N$  درصد از خودروها انصراف دهند. آنگاه تعداد درخواست‌های کنسل شده بر اساس رابطه (۱۸) خواهد بود:

$$R = \lambda P_N \quad (18)$$

تعداد شارژرهای بلااستفاده برابر است با تفاوت میان کل شارژرها و شارژرهای مشغول به کار که توسط توسط رابطه‌ی (۱۹) بدست می‌آید:

$$I_s = s - B \quad (19)$$

و تعداد فضاهای بلااستفاده برابر است با تعداد کل فضاها منهای تعداد فضاهایی که برای صف‌بندی خودروهای در حال انتظار اختصاص داد شده است که از رابطه‌ی (۲۰) محاسبه می‌شود [۲۶،۲۹]:

$$I_w = w - L \quad (20)$$

بنابراین مدل بهینه‌سازی طراحی ایستگاه شارژ را می‌توان به صورت رابطه (۲۱) نمایش داد:

$$\max \sum_{t=1}^{48} E(t), s. t. \begin{cases} 1 \leq s \leq s_{max} \\ 0 \leq w \leq w_{max} \end{cases} \quad (21)$$

که در رابطه (۲۱)  $s_{max}$  بیانگر بیشترین تعداد مجاز شارژرهای خودروی برقی و  $w_{max}$  بیانگر بیشترین فضای موجود برای نصب ایستگاه‌های شارژ است که از رابطه‌ی (۲۲) بدست می‌آید:

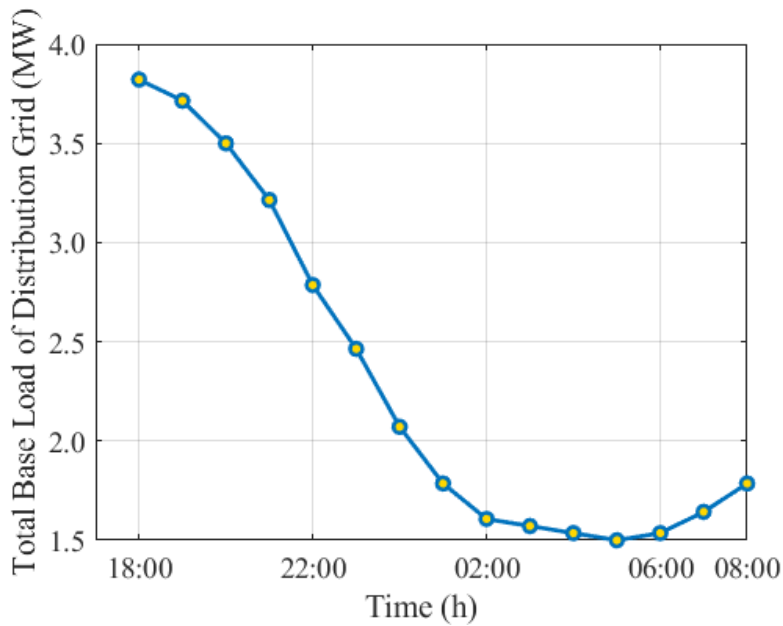
$$s_{max} = \frac{C_{sub} - P_b}{P_f} \quad (22)$$

که در این رابطه عبارت  $\frac{C_{sub} - P_b}{P_f}$  بیانگر بیشترین تعداد شارژرها بدون تجاوز از ظرفیت مجازی است که توسط ترانسفرمر پست اعمال شده است. در ادامه فلوچارت شکل ۱ مراحل را بهتر شرح می‌دهد.

### ۳- تحلیل و شبیه سازی

در این مقاله یک شبکه توزیع در نظر گرفته شده است که دارای ۱۰۰ گره بار می‌باشد [۱۶]. تمامی گره‌ها نیز مستقیماً توسط ترانسفرمر توزیع به پست شبکه متصل شده‌اند. هر باس دارای ۱۰ منزل مسکونی است که ساکنان آن خودروی خود را در منزل شارژ می‌کنند. ظرفیت ترانسفرمر توزیع که این ۱۰ منزل را تغذیه می‌کند برابر ۲۵ کیلوولت آمپر در نظر گرفته شده است. یک پارکینگ عمومی خودروی برقی نیز در شبکه مستقر است و ظرفیت ترانسفرمر آن نیز ۵۰۰ مگاوات آمپر در نظر گرفته شده است. کل شبکه دارای ۱۲۰۰ خودروی برقی است که ۱۰۰۰ دستگاه آن در مناطق مسکونی (۱۰۰ باس با ۱۰ منزل) و ۲۰۰ خودروی دیگر در پارکینگ خودروی برقی شارژ می‌شوند. فرض شده است که پارکینگ خودروی برقی دارای هیچ بار پایه یا سنتی نباشد. اما بارهای مسکونی دارای بار پایه مشابهی باشند [۱۷]. برای سادگی محاسبات نیز رفتار شارژ خودروی برقی تمامی ۱۰۰ باس مسکونی مشابه یکدیگر در نظر گرفته شده است. بنابراین تنها ۱۰ خودروی منزل هر باس بهینه‌سازی خواهد شد و به عبارت دیگر رفتار خودروها در باس‌های مسکونی دیگر به طور مشابه خواهد بود. نرخ شارژ خودروهای برقی نیز برابر با  $\frac{3}{3}$  کیلووات در نظر گرفته شده است. فرض شده است که تمامی خودروها در ساعات ۱۸:۰۰ غروب به شبکه اتصال یافته‌اند و در ساعت ۸:۰۰ صبح روز بعد از آن خارج خواهند شد. همچنین فرض شده است که خودروها در زمان اتصال به شبکه فاقد هر گونه شارژی باشند و در زمان خروج از شبکه دارای شارژ کامل باشند. زمان شارژ کامل هر خودرو ۶ ساعت در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به تعیین ظرفیت بهینه ایستگاه‌های شارژ همان داده‌های رابطه (۱۱) هستند. ضرایب هزینه مربوط به رابطه (۱۱) در جدول (۲) بیان شده است [۱۶].





شکل (۲): بار پایه کل شبکه توزیع

جدول (۲): پارامترهای اقتصادی مربوط به ظرفیت ایستگاه شارژ

ضریب	مقدار	یکا	ضریب	مقدار	یکا
$C_1$	۵	دلار	$C_5$	۰/۰۵	دلار
$C_2$	۱	دلار	$S_{max}$	۲۰	عدد
$C_3$	۲	دلار	$W_{max}$	۲۰	عدد
$C_4$	۰/۵	دلار	نرخ ترافیک خودرو	۱۰۰	خودرو در ساعت

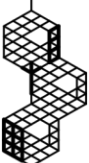
### ۳-۱- مورد های مطالعاتی

در این مقاله مورد های مطالعاتی متنوعی در نظر گرفته شده است که هر یک بیانگر جنبه‌ی متفاوتی از شبیه‌سازی می‌توانند باشند. این موارد مطالعاتی عبارتند از:

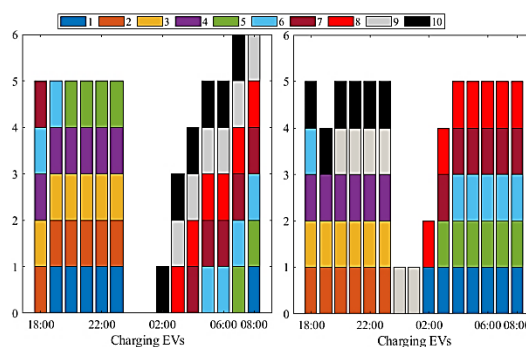
مورد ۱: پیاده‌سازی مدیریت شارژ خودروهای برقی با در نظرگیری شارژ گسسته بدون لحاظ نمودن تعیین ظرفیت بهینه ایستگاه شارژ و بدون قرارداد جریمه‌ای برای شارژ در لحظات پایانی.

مورد ۲: پیاده‌سازی مدیریت شارژ خودروهای برقی با در نظرگیری نرخ شارژ گسسته بدون لحاظ نمودن تعیین ظرفیت بهینه ایستگاه شارژ و قرارداد جریمه‌ای برای شارژ در لحظات پایانی.

مورد ۳: ادغام مساله تعیین ظرفیت بهینه ایستگاه شارژ با مساله مدیریت شارژ خودروهای برقی در واقع در مورد های ۱ و ۲ هیچ گونه تعیین ظرفیت بهینه‌ای صورت نمی‌گیرد و صرفاً نقش اعمال جریمه برای ماکول‌سازی شارژ به لحظات نهایی مشخص خواهد شد. با این کار در لحظه پایان شارژ (یعنی ساعت ۸ بامداد) دیگر شاهد فراجش بزرگی در پروفیل بار شبکه نخواهیم بود.



نتیجه شبیه سازی مورد ۱ در قالب شکل (۳) ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، تعداد تغییر وضعیت شارژ خودروها در نمودار سمت راست (حاصل از اعمال رابطه ۷) نسبت به نمودار سمت چپ (بدون اعمال رابطه ۷) بسیار کمتر است. به طور مثال خودروی شماره ۱، برای تامین شارژ خود در هر دو شکل، ۶ ساعت شارژ شده است (چون قید تامین توان در هر دو رابطه یکسان است و خودرو باید به طور کامل شارژ می شده است) اما این خودرو در شکل سمت چپ ۳ بار در این مدت تغییر وضعیت شارژ داده است. اما در نمودار سمت راست، مشاهده می شود که خودروی شماره ۱، تا ساعت ۲ بامداد شارژ نشده و سپس تا ساعات پایانی مجاز برای شارژ، اقدام به تامین شارژ مورد نیاز خود کرده است. یا به طور مثال خودروی شماره ۴ (رنگ بنفش)، در منحنی سمت چپ از ساعت ۱۸ تا ۲ بامداد ممتد شارژ شده اما سپس خاموش شده و تنها در ساعت ۶ برای تامین یک ساعت از شارژ خود سریعاً قطع و وصل شده است که منجر به عدم بهره‌وری بهینه از ایستگاه شارژ شده است. اما در مورد سمت راست همین خودرو صرفاً از ساعت ۲۳ تا ساعت ۸ صبح به طور پیوسته بدون هیچ گونه قطعی شارژ شده است. بنابراین اهمیت اعمال رابطه (۷) به خوبی مشخص می گردد. ذکر یک نکته‌ی دیگر نیز در مورد این شکل ضروری به نظر می رسد، این دو منحنی در تعداد خودروهای در حال شارژ در ساعات ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۱۹ و ۲۴ بامداد با یکدیگر یک واحد تفاوت دارند اما در سایر ساعات تعداد خودروهای در حال شارژ دو روش یکسان است. از دیدگاه نظری باید تعداد خودروهای در حال شارژ دو روش بایکدیگر کاملاً برابر باشد که لازمه آن برقراری یک قید تساوی  $\sum_{n=1}^{NEV} U_{n,t} = v_t^*$  است. اعمال این قید تساوی که به شدت از دیدگاه بهینه‌سازی سختگیرانه است منجر به صرف زمان زیاد برای دسترسی به جواب‌های مساله می شود که چندان نمی تواند در کاربردهای زمان واقعی موثر واقع شود. بنابراین کمی این قید ساده تر شده و در قالب  $v_t^* - 1 \leq \sum_{n=1}^{NEV} U_{n,t} \leq v_t^* + 1$  پیاده سازی شده است.

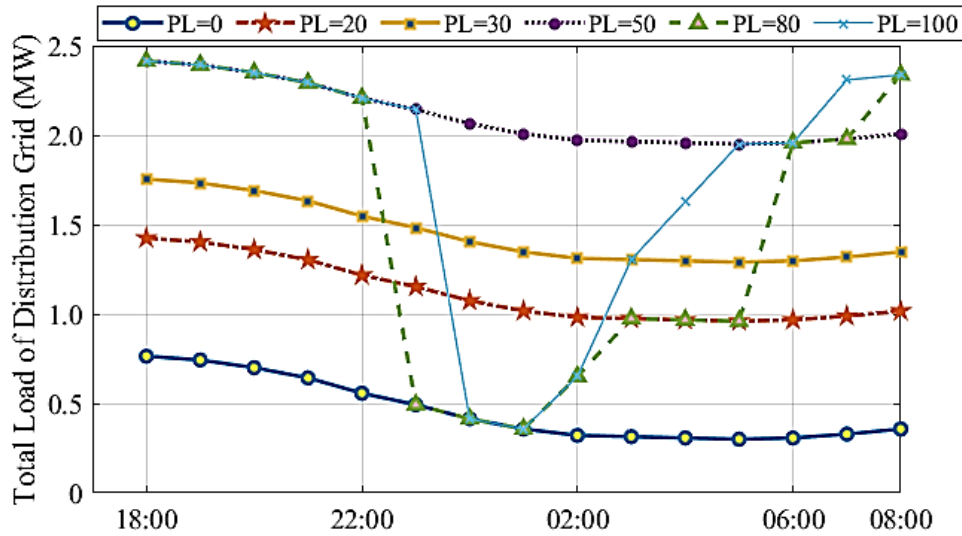


شکل (۳): وضعیت شارژ خودروها قبل از اعمال رابطه ۷ (سمت چپ) و بعد از اعمال آن (سمت راست)

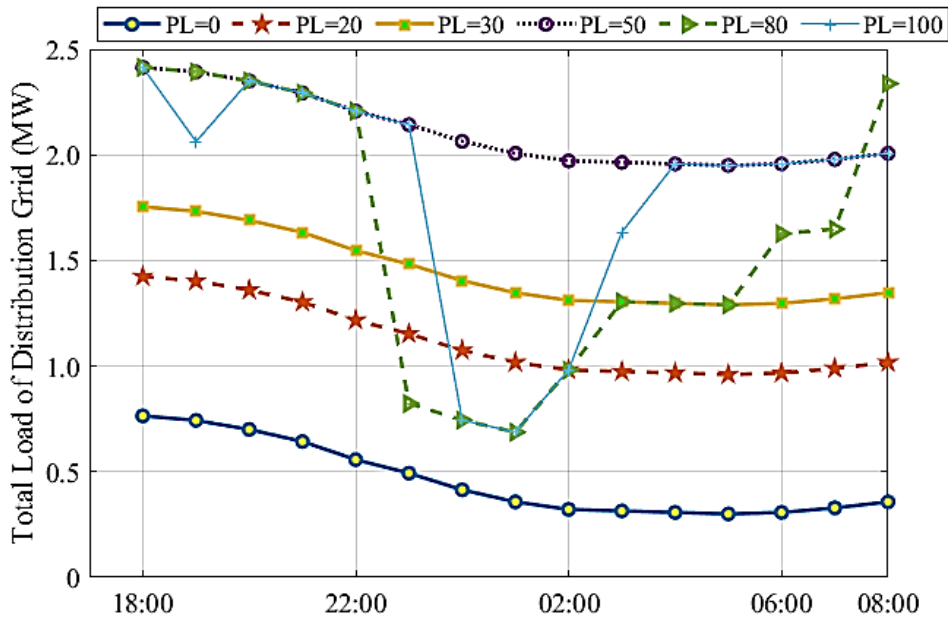
شکل (۴) مربوط به وضعیتی است زمان شارژ هر خودروی برق ۶ ساعت انتخاب شود. به عبارت دیگر می توان گفت رابطه (۶) بدون توجه به محدودیت‌های عملی شارژر تنها اقدام به مسطح سازی پروفیل بار پرداخته است و به نفع بهره‌بردار شبکه است. در رابطه (۹) یکنواخت شارژ شدن خودروها بیشتر اولویت داشته و به نفع ایستگاه شارژ خواهد بود. در صورتی که قید سختگیرانه  $\sum_{n=1}^{NEV} U_{n,t} = v_t^*$  رعایت گردد، هم بهره بردار شبکه و هم خودروی برقی به طور همزمان به منفعت خواهند رسید، اما قابلیت پیاده‌سازی آنالین یا زمان واقعی روش با مشکل مواجه خواهد شد.

در ادامه به بررسی تاثیر سطح نفوذ خودروهای برقی در پروفیل بار شبکه پرداخته می شود و فرض شده است که هر خودروی برقی برای شارژ خود نیاز به ۶ ساعت شارژ داشته باشد. با افزایش سطح نفوذ خودروی برقی (نسبت خودروهای برقی به تعداد کل خودروها)، انتظار می رود سهم شارژ خودروهای برقی بیشتر شده و از سهم بار پایه کاسته شود.





شکل (۴): پروفیل بار شبکه در سطوح نفوذ مختلف خودروی برقی



شکل (۵): پروفیل بار شبکه در سطوح نفوذ مختلف خودروی برقی با ادغام رابطه (۷)

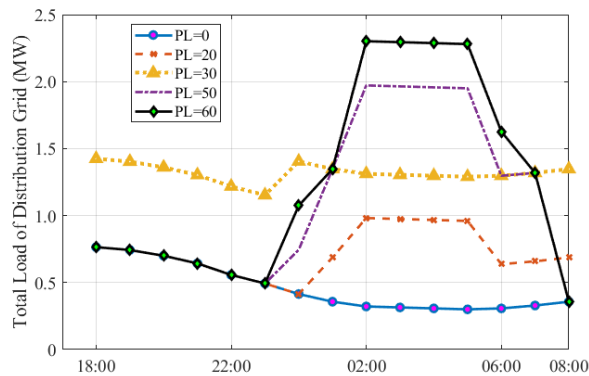
پروفیل بار کل شبکه در سطوح نفوذ ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصدی خودروی برقی در صورت عدم اعمال رابطه (۹) و اعمال آن به ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است، با افزایش سطح نفوذ خودروهای برقی بار شبکه افزایش می‌یابد تا جایی که از محدودیت ترانسفرهای توزیع عبور ننماید. در سطوح نفوذ ۸۰ و ۱۰۰ درصدی خودروهای برقی، با توجه به اینکه ترانسفرهای توزیع محدودیت ساز می‌شوند شاهد نوساناتی در پروفیل بار هستیم. در واقع محدودیت خطوط منجر شده تا تناقضی میان دو هدف مسطح سازی پروفیل بار و در عین حال تامین شارژ مورد نیاز خودروهای برقی ایجاد شود. تامین شارژ خودرو اولویت بالاتری نسبت به مسطح سازی پروفیل بار خواهد دارد.

### ۳-۲-۲-۲ مورد ۲

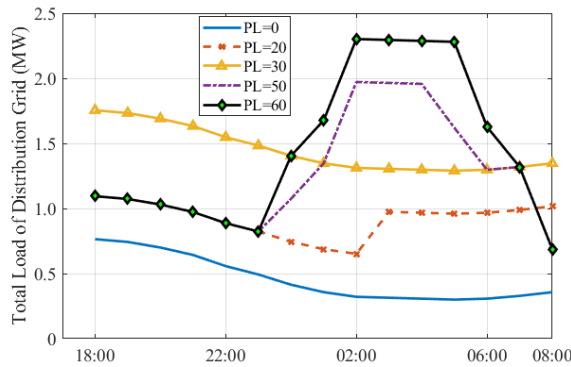
این مورد مطالعاتی نیز مشابه مورد مطالعاتی شماره ۱ است با این تفاوت که یک ضریب وزنی در تابع هدف رابطه‌ی (۸) طوری ضرب شده است که جریمه در ساعات پایانی شارژ گرانتر شود. در واقع این ضریب به صورتی تنظیم شده است که تا قبل از ساعت ۴ بامداد



برابر یک بوده و پس از آن به صورت خطی افزایش یابد. بنابراین خواهیم داشت:  $\omega_t = \begin{cases} 1 & 18^{pm} \leq t \leq 4^{am} \\ t-4 & t > 4^{am} \end{cases}$ . با در نظرگیری این ضریب انتظار می‌رود که زمان‌های شارژ به ساعات پایانی موکول نشود و بدین ترتیب در ساعات پایانی شارژ مواجه جهشی در میزان پروفیل بار نباشیم. نتایج مربوط به شبیه‌سازی روابط (۸) و (۹) در این مورد نیز در شکل (۶) نمایش داده شده‌است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، نسبت به مورد شماره ۱، خودروها تمایل بیشتری به شارژ در ساعات اولیه دارند و کمتر شارژ خود را به تاخیر انداخته‌اند. از ساعت ۵ صبح تا ساعت ۸ صبح به دلیل گران بودن مقدار جریمه، پروفیل‌های بار روندی نزولی به خود گرفته‌اند و بدین ترتیب در زمان نهایی شارژ مانند مورد ۱ شاهد بالا بودن مقدار بار شبکه نخواهیم بود. در منحنی (۵) تنها هدف بهره‌بردار شبکه مدنظر قرار گرفته است. اگر قرار باشد، آسیب‌رسانی به شارژرها نیز کمتر شود، با اعمال قیود رابطه (۹) نتایج به صورت شکل (۷) در خواهد آمد که اندکی تغییر را در برخی از ضرایب نفوذ نشان می‌دهد.



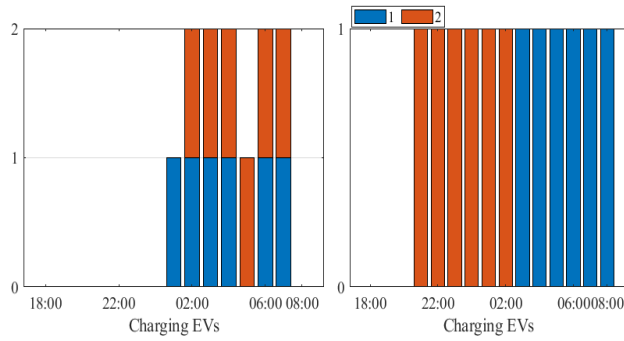
شکل (۶): پروفیل بار شبکه برای سطوح مختلف خودروی برقی در مورد ۲ بدون اعمال قید رابطه (۹)



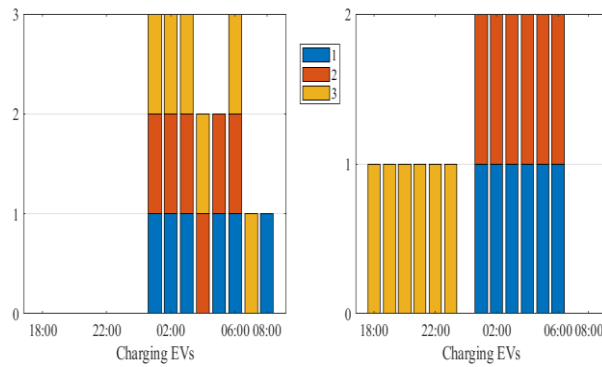
شکل (۷): پروفیل بار شبکه برای سطوح مختلف خودروی برقی در مورد ۲ با اعمال قید رابطه (۹)

شکل‌های (۶) و (۷) میزان تاثیر نحوه جریمه‌گذاری را بر رفتار مشترکین خودرو و شارژ آن‌ها به خوبی نشان می‌دهند. هرچه جریمه‌ی زمان‌های نهایی شارژ بیشتر شود، مشترکین شارژ خود رو زودتر آغاز می‌کنند. نتایج مربوط به وضعیت سطح شارژ خودروها در هر یک از سطوح نفوذ ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۶۰ درصدی به ترتیب در شکل‌های (۸)، (۹)، (۱۰) و (۱۱) نمایش داده شده‌است. نکته قابل توجه در مورد مفهوم سطح نفوذ خودروی برقی این است که منظور از سطح نفوذ ۱۰۰ درصدی یعنی هر ده خانه مستقر در باس دارای خودروی برقی باشند. منظور از سطح نفوذ ۲۰ درصدی، یعنی از هر ۱۰ خانه‌ی هر باس، تنها دو خانه دارای خودروی برقی باشند.

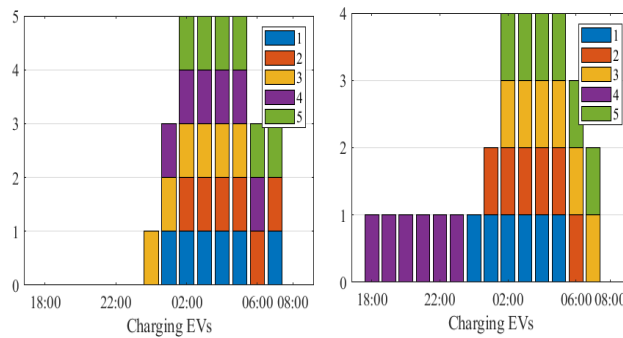




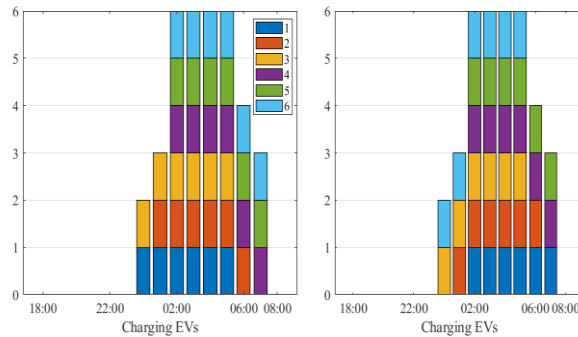
شکل (۸): وضعیت شارژ خودروها قبل از اعمال رابطه ۷ (سمت چپ) و بعد از اعمال آن (سمت راست) (سطح نفوذ ۲۰ درصد)



شکل (۹): وضعیت شارژ خودروها قبل از اعمال رابطه ۷ (سمت چپ) و بعد از اعمال آن (سمت راست) (سطح نفوذ ۳۰ درصد)



شکل (۱۰): وضعیت شارژ خودروها قبل از اعمال رابطه ۷ (سمت چپ) و بعد از اعمال آن (سمت راست) (سطح نفوذ ۵۰ درصد)

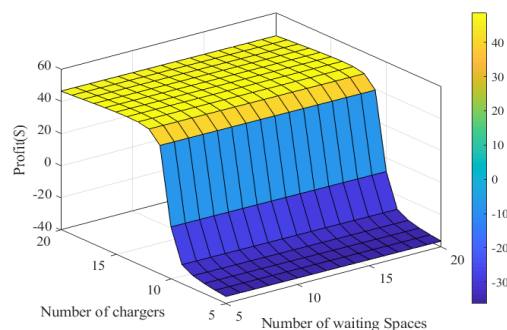


شکل (۱۱): وضعیت شارژ خودروها قبل از اعمال رابطه ۷ (سمت چپ) و بعد از اعمال آن (سمت راست) (سطح نفوذ ۶۰ درصد)

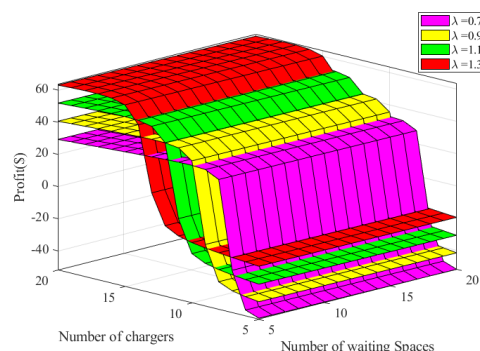




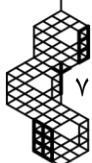
مورد مطالعاتی شماره ۱ در سطح نفوذهای بالای ۷۰ درصد و مورد مطالعاتی شماره ۲ در سطح نفوذهای بالای ۶۰ درصد، قادر به دستیابی جواب‌های نبودند چون امکان شارژ تمامی خودروها با افزایش سطح نفوذ آنها کاهش می‌یابد. بنابراین فرض شده است که سایر خودروها برای شارژ به پارکینگ‌های شارژ مراجعه کنند. با توجه به محدودیت ترانسفرمر متصل به باس تجاری (۵۰۰ مگاوات آمپر) و با توجه به نرخ شارژ ۳/۳ کیلوواتی خودروهای برقی، تا ۱۵۰ خودرو نهایتاً می‌توانند به ایستگاه شارژ مراجعه نمایند. در این مقاله فرض شده است که فضای پارکینگ شارژ خودروی برقی برابر ۱۰۰ دستگاه در نظر گرفته شود، تا ترانسفرمر توزیع نیز وارد اضافه باری نشود. چون پارکینگ در منطقه‌ی تجاری قرار گرفته است، فرض شده است که نرخ ورود خودروها به پارکینگ به طور متوسط برابر با ۱۰/۲۸ خودرو در هر نیم ساعت باشد. همچنین برای سادگی فرض شده است که هیچ‌گونه درخواست کنسلی نیز از طرف رانندگان ارائه نشود. در این صورت میزان سود بهره‌بردار پارکینگ در ازای تعداد شارژرهای مختلف و فضای انتظار مختلف در قالب شکل (۱۲) خواهد بود که محور عمودی بیانگر سود پارکینگ بر حسب دلار می‌باشد. بیشترین سود در این نمودار مربوط به حالتی است که تعداد شارژرها برابر  $S=14$  و تعداد فضاهای مورد انتظار برابر با  $W=5$  است. بیشترین مقدار سود برابر با ۴۸/۷۱۹۵ دلار بدست آمده است. با توجه به شکل (۱۲) میتوان اسنباط کرد که با کاهش تعداد شارژها، سود ایستگاه شارژ کمتر خواهد شد. چون زمانی که نرخ ترافیک عدد قابل توجه ۱۰/۲۸ خودرو در نیم ساعت را به خود اختصاص داده است، با کم شدن تعداد شارژها، خودروهای بسیاری در صف انتظار باقی می‌مانند که خود هزینه بر بوده و منجر به کاهش سود پارکینگ خواهد شد. افزایش فضای انتظار منجر به افزایش سود با شیب نسبتاً کمی می‌شود. علت این امر این است که حتی اگر خودروها در پارکینگ جا داده شوند اما ایستگاه‌های شارژ پر شده باشند و کفایت نکنند، آنچنان سودی نصیب بهره‌بردار پارکینگ نخواهد شد و تنها رضایت مشترکین پیدا کردن جایی برای پارک آنها می‌باشد. حال نقش یکی از پارامترهای مهم در تعیین ظرفیت ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی را مورد تحلیل حساسیت قرار می‌دهیم. پارامتر نرخ ورود خودروها به پارکینگ برابر با ۱۰/۲۸ در نظر گرفته شده‌باشد. حال افزایش و کاهش ۱۰ درصدی و ۳۰ درصدی این پارامتر را بر میزان سود مساله مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.

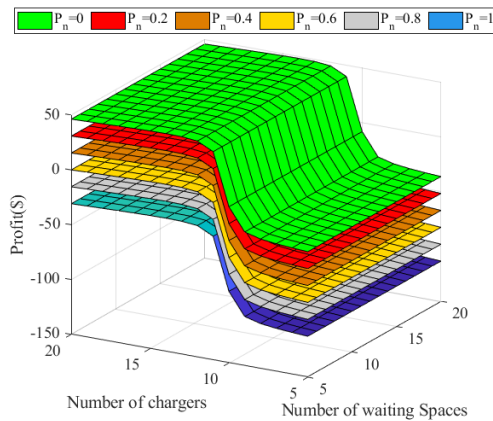


شکل (۱۲): سود پارکینگ بر حسب تعداد شارژرها و تعداد فضاهای انتظار (بدون در نظرگیری کنسلی)



شکل (۱۳): تحلیل حساسیت ظرفیت ایستگاه شارژ نسبت به نرخ ورود خودروها به پارکینگ





شکل (۱۴): تحلیل حساسیت ظرفیت ایستگاه شارژ نسبت به نرخ کنسلی رانندگان

همانطور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، منحنی مربوط به افزایش ۳۰ درصدی نرخ ورود خودروها در بالای سایر نمودارها قرار گرفته است و کاهش ۳۰ درصدی نرخ ورود در پایین‌ترین وضعیت قرار گرفته است. در واقع این امر نشان می‌دهد، با افزایش تردد خودروها در پارکینگ، فضا برای سود بیشتر صاحب پارکینگ فراهم می‌شود. البته بیشترین مقدار مجاز افزایش این نرخ ۵۰ درصد است که پس از آن محدودیت ترانسفرمر توزیع چالش ایجاد خواهد کرد. با افزایش تردد به پارکینگ، تعداد شارژرهای مورد نیاز نیز بیشتر خواهد شد و در واقع افزایش شارژرها و فضای انتظار در این حالت توجیه اقتصادی بیشتری دارد.

همانطور که در شکل (۱۴) مشخص است، در صورتی که نرخ کنسلی صفر باشد، یعنی هیچ درخواست کنسلی صادر نشود، بیشترین سود عاید پارکینگ خواهد شد. در صورتی که نرخ کنسلی افزایش یابد، سود پارکینگ شروع به کاهش می‌کند تا جایی که در نرخ کنسلی ۱ (یعنی کنسلی ۱۰۰ درصدی تمام رانندگان) به طور کامل پارکینگ دچار زیان خواهد شد. نرخ کنسلی ۶۰ درصدی به بالا هیچ‌گونه سودی را برای مالک پارکینگ به ارمغان نخواهد آورد.

#### ۴- نتیجه گیری

برای مدیریت خودروهای برقی در شبکه‌های توزیع، روش‌های متنوعی برای شارژ هماهنگ خودروهای برقی ارائه شده است که نرخ شارژ در بیشتر این روش‌ها به صورت پیوسته در نظر گرفته شده است. این فرض تاثیر بسزایی از نظر فنی و اقتصادی بر مسئله دارد. در دنیای واقعی ایستگاه‌های شارژ دارای محدودیت ظرفیت هستند. بنابراین پیوسته در نظر گرفتن نرخ شارژ چندان دقیق نبوده و قابل اجرا نمی‌باشد. در این مقاله مساله شارژ هماهنگ خودروهای برقی با نرخ گسسته مورد بررسی قرار گرفت. مساله شامل تابع هدف و قیود مرزی متنوع بوده و قیود امنیتی شبکه در آن در نظر گرفته شد. مساله بهینه‌سازی گسسته نیز به صورت یک مساله دو مرحله‌ای ارائه شد که به راحتی با استفاده از ابزارهای برنامه‌ریزی خطی قابل حل می‌باشد. همچنین نشان داده شد که مساله بهینه‌سازی جزو روش‌های چند جمله‌ای غیر قطعی سخت<sup>۱۰</sup> بوده و در سطح نفوذ بالای خودروهای برقی بسیار زمانبر است. در نتیجه روشی برای محاسبه مساله ارائه گردید. علاوه بر موارد فوق در این مقاله راه‌کارهایی برای برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای برقی ارائه شد که در آن بار مصرفی هر یک از ایستگاه‌ها بر اساس زمان ورود و خروج خودروها محاسبه شد. به صورت خلاصه نتایج زیر را می‌توان از مقاله فوق بیان نمود:

- ارائه مدلی دقیق مبتنی بر روش برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای برنامه‌ریزی گسسته ایستگاه‌های شارژ سریع خودروی برقی
  - بررسی عملکرد مدل پیشنهادی در سناریوهای مختلف به منظور صحت سنجی
  - افزایش سوددهی پارکینگ‌های شارژ سریع
- به عنوان پیشنهادهایی برای ادامه کار می‌توان به موارد زیر اشاره نمود
- در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از شبکه ترافیک شهری بر برنامه‌ریزی ایستگاه‌ها
  - حل مسئله با روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی
  - تأثیر حضور همزمان منابع تجدیدپذیر بادی و خودروهای برقی در برنامه‌ریزی

- [1] A. Ahmad, Z. A. Khan, M. Saad Alam, and S. Khateeb, "A Review of the Electric Vehicle Charging Techniques, Standards, Progression and Evolution of EV Technologies in Germany," *Smart Science*, vol. 6, no. 1. 2018. doi: 10.1080/23080477.2017.1420132.
- [2] H. Shareef, M. M. Islam, and A. Mohamed, "A review of the stage-of-the-art charging technologies, placement methodologies, and impacts of electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64. 2016. doi: 10.1016/j.rser.2016.06.033.
- [3] G. Binetti, A. Davoudi, D. Naso, B. Turchiano, and F. L. Lewis, "Scalable Real-Time Electric Vehicles Charging with Discrete Charging Rates," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 6, no. 5, 2015, doi: 10.1109/TSG.2015.2396772.
- [4] Z. Ma, D. S. Callaway, and I. A. Hiskens, "Decentralized charging control of large populations of plug-in electric vehicles," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 1, 2013, doi: 10.1109/TCST.2011.2174059.
- [5] O. Sundström and C. Binding, "Flexible charging optimization for electric vehicles considering distribution grid constraints," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 3, no. 1, 2012, doi: 10.1109/TSG.2011.2168431.
- [6] V. Aravinthan and W. Jewell, "Controlled electric vehicle charging for mitigating impacts on distribution assets," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 6, no. 2, 2015, doi: 10.1109/TSG.2015.2389875.
- [7] N. Chen, C. W. Tan, and T. Q. S. Quek, "Electric vehicle charging in smart grid: Optimality and valley-filling algorithms," *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 6, 2014, doi: 10.1109/JSTSP.2014.2334275.
- [8] S. Vandael, B. Claessens, M. Hommelberg, T. Holvoet, and G. Deconinck, "A scalable three-step approach for demand side management of plug-in hybrid vehicles," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 4, no. 2, 2013, doi: 10.1109/TSG.2012.2213847.
- [9] W. Tang, S. Bi, and Y. J. A. Zhang, "Online coordinated charging decision algorithm for electric vehicles without future information," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 5, no. 6, 2014, doi: 10.1109/TSG.2014.2346925.
- [10] H. Zhang, S. J. Moura, Z. Hu, and Y. Song, "PEV Fast-Charging Station Siting and Sizing on Coupled Transportation and Power Networks," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 9, no. 4, 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2614939.
- [11] H. Zhang, Z. Hu, Z. Xu, and Y. Song, "An Integrated Planning Framework for Different Types of PEV Charging Facilities in Urban Area," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 7, no. 5, 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2436069.
- [12] H. Zhang, Z. Hu, Z. Xu, and Y. Song, "Optimal Planning of PEV Charging Station with Single Output Multiple Cables Charging Spots," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 8, no. 5, 2017, doi: 10.1109/TSG.2016.2517026.
- [13] P. Sadeghi-Barzani, A. Rajabi-Ghahnavieh, and H. Kazemi-Karegar, "Optimal fast charging station placing and sizing," *Appl Energy*, vol. 125, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.03.077.
- [14] W. Yao, C. Y. Chung, F. Wen, M. Qin, and Y. Xue, "Scenario-based comprehensive expansion planning for distribution systems considering integration of plug-in electric vehicles," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 1, 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2403311.
- [15] B. Zhou, F. Yao, T. Littler, and H. Zhang, "An electric vehicle dispatch module for demand-side energy participation," *Appl Energy*, vol. 177, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.05.120.
- [16] Q. Cui, Y. Weng, and C. W. Tan, "Electric Vehicle Charging Station Placement Method for Urban Areas," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 10, no. 6, 2019, doi: 10.1109/TSG.2019.2907262.
- [17] M. H. Amini, M. P. Moghaddam, and O. Karabasoglu, "Simultaneous allocation of electric vehicles' parking lots and distributed renewable resources in smart power distribution networks," *Sustain Cities Soc*, vol. 28, 2017, doi: 10.1016/j.scs.2016.10.006.
- [18] A. Nasri, A. Abdollahi, M. Rashidinejad, and M. Hadi Amini, "Probabilistic-possibilistic model for a parking lot in the smart distribution network expansion planning," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 12, no. 13, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.0366.
- [19] H. Saboori, R. Hemmati, and V. Abbasi, "Multistage distribution network expansion planning considering the emerging energy storage systems," *Energy Convers Manag*, vol. 105, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.08.055.





- [20] M. Moradijoz, M. Parsa Moghaddam, and M. R. Haghifam, "A flexible distribution system expansion planning model: A dynamic Bi-level approach," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 9, no. 6, 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2697917.
- [21] A. Ehsan and Q. Yang, "Active distribution system reinforcement planning with EV charging stations - Part I: Uncertainty modeling and problem formulation," *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 11, no. 2, 2020, doi: 10.1109/TSTE.2019.2915338.
- [22] P. M. De Quevedo, G. Munoz-Delgado, and J. Contreras, "Impact of Electric Vehicles on the Expansion Planning of Distribution Systems Considering Renewable Energy, Storage, and Charging Stations," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 10, no. 1, 2019, doi: 10.1109/TSG.2017.2752303.
- [23] J. Aghaei, A. E. Nezhad, A. Rabiee, and E. Rahimi, "Contribution of Plug-in Hybrid Electric Vehicles in power system uncertainty management," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.207.
- [24] B. Sun, Z. Huang, X. Tan, and D. H. K. Tsang, "Optimal scheduling for electric vehicle charging with discrete charging levels in distribution grid," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 9, no. 2, 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2558585.
- [25] A. Arezooye Araghi, A. Ahmarinejad, M. Alizadeh, and M. Babaei, "Optimizing Energy and Ancillary Services Markets in Transmission and Distribution Networks Through a Two-Stage Optimal Framework Considering Flexible Loads, Electric Vehicles, and Storage Systems," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 2, no. 4, pp. 38–64, 2024, doi: 10.30486/teeges.2023.1986699.1074.
- [26] J. Ebrahimi, M. Abedini, M. M. Rezaei, and M. Nasri, "Optimum design of a multi-form energy in the presence of electric vehicle charging station and renewable resources considering uncertainty," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 23, 2020, doi: 10.1016/j.segan.2020.100375.
- [27] Q. Yang, S. Sun, S. Deng, Q. Zhao, and M. Zhou, "Optimal Sizing of PEV Fast Charging Stations with Markovian Demand Characterization," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 10, no. 4, 2019, doi: 10.1109/TSG.2018.2860783.
- [28] P. Khademi Astaneh and H. Sheikh Shahrokh Dehkordi, "Integrated Optimal Active and Reactive Power Planning in Smart Microgrids with Possibility of One-Hour Islanding," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 2, no. 2, pp. 36–50, 2023, doi: 10.30486/teeges.2023.1979749.1063.
- [29] M. Emadi, H. R. Massrur, E. Rokrok, and A. Samanfar, "A Comprehensive Framework for Optimal Stochastic Operating of Energy Hubs Integrated with Responsive Cooling, Thermal and Electrical Loads, and Ice Storage System by an Improved Self-Adaptive Slime Mold Optimization Algorithm," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 2, no. 1, pp. 77–95, 2023, doi: 10.30486/teeges.2022.1969195.1043.

## زیر نویس‌ها

- 
- <sup>1</sup> Fast charge
  - <sup>2</sup> Electric vehicle
  - <sup>3</sup> Real time
  - <sup>4</sup> Mixed Integer nonlinear programming
  - <sup>5</sup> Multi objective
  - <sup>6</sup> Active distribution network
  - <sup>7</sup> Global optimum
  - <sup>8</sup> MATLAB
  - <sup>9</sup> Vehicle-to-grid
  - <sup>10</sup> Nondeterministic polynomial hard

